



Caractéristiques courant-tension de jonctions P-N fabriquées par traitement laser

E. Fogarassy, A. Slaoui, P. Siffert

► To cite this version:

E. Fogarassy, A. Slaoui, P. Siffert. Caractéristiques courant-tension de jonctions P-N fabriquées par traitement laser. *Revue de Physique Appliquée*, 1985, 20 (3), pp.157-162. 10.1051/rphysap:01985002003015700 . jpa-00245318

HAL Id: jpa-00245318

<https://hal.science/jpa-00245318>

Submitted on 1 Jan 1985

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
73.40L

Caractéristiques courant-tension de jonctions P-N fabriquées par traitement laser (+)

E. Fogarassy, A. Slaoui et P. Siffert

CRN, Groupe de Physique et Applications des Semiconducteurs PHASE, 23 rue du Loess,
67037 Strasbourg Cedex, France

(Reçu le 16 mai 1984, révisé le 15 novembre, accepté le 26 novembre 1984)

Résumé. — Le but de ce travail est d'analyser les caractéristiques courant-tension des jonctions P-N fabriquées dans du silicium au moyen d'impulsions laser brèves et de fortes puissances permettant de fondre superficiellement le silicium et de les comparer aux propriétés des diodes préparées par diffusion thermique classique. L'origine des modifications observées est attribuée d'une part à la création de défauts dans la zone de charge d'espace et à la surface des échantillons par l'impulsion laser, d'autre part à la constitution de solutions solides sursaturées, caractérisées par une densité très élevée de porteurs électriquement actifs.

Abstract. — The aim of this paper is to analyse the current-voltage characteristics of P-N junctions prepared on silicon by pulsed laser melting. Their properties shall be compared to those of classical thermal diffused diodes. The observed modifications are attributed first to the creation of defects in space charge region as well as at the surface of the treated layers, secondly to the formation of supersaturated solid solutions which present high densities of electrically active carriers.

1. Introduction.

La fusion superficielle du silicium au moyen d'une impulsion laser brève et de forte puissance, et sa recristallisation, ont fait l'objet de très nombreux travaux ces dernières années. Les possibilités offertes par cette technique pour fabriquer des jonctions P-N fortement dopées, destinées soit aux applications photovoltaïques [1-3], soit à la microélectronique [4] ont été démontrées. Cependant, quel que soit leur mode de fabrication, on observe des modifications importantes des caractéristiques électriques de ces jonctions, par rapport à celles qui sont préparées au moyen de traitements thermiques conventionnels (diffusion thermique du dopant ou implantation ionique associée à un recuit thermique). Le but de ce travail est d'analyser et de discuter quelques-unes de ces modifications. Les jonctions ont été élaborées par trois techniques différentes :

— par irradiation laser de jonctions diffusées thermiquement [5],

— par diffusion laser du dopant, initialement déposé en couche mince à la surface du substrat de silicium [2],
— par recuit laser d'échantillons de silicium implanté préalablement recuit thermiquement.

Leurs caractéristiques électriques seront étudiées et comparées aux diodes préparées par diffusion thermique conventionnelle.

2. Conditions expérimentales.

2.1 TRAITEMENT LASER. — Le traitement des échantillons s'effectue, soit au moyen d'un laser rubis ($\lambda = 0,69 \mu\text{m}$), délivrant des impulsions brèves ($\tau = 20 \text{ ns}$) dont le diamètre de faisceau est de l'ordre de 8 mm , soit d'un laser yag, émettant à la longueur d'onde $\lambda = 0,53 \mu\text{m}$ des impulsions de durée $\tau = 100 \text{ ns}$ et de petit diamètre ($100 \mu\text{m}$). Dans ce dernier cas un système de balayage du faisceau laser permet le traitement de grandes surfaces. Ces deux types de laser délivrent des impulsions dont l'énergie est comprise entre 1 et $2,5 \text{ J cm}^{-2}$, permettant de porter la surface du silicium à la température de fusion. La zone fondue, dont l'épaisseur n'excède généralement pas $0,5 \mu\text{m}$, recristallise ensuite suivant un processus d'épitaxie en phase liquide.

(+) Communication présentée aux Journées du G.C.I.S., Toulouse les 15 et 16 décembre 1983.

2.2 FABRICATION DES JONCTIONS. — Nous avons travaillé, dans tous les cas, sur des jonctions N^+/P , fabriquées dans des substrats orientés (111) ou (100) de type P de faible résistivité ($\rho = 1-5 \Omega \cdot \text{cm}$).

— Dans le premier cas des diodes fabriquées par diffusion thermique de phosphore (850 °C, 45 min), sont irradiées au moyen d'une impulsion laser (Rubis).

— Dans le second cas, des films minces (50 Å) d'antimoine sont déposés à la surface du silicium. Sous l'effet de l'impulsion laser (rubis), l'élément dopant est entraîné en profondeur dans la zone fondue.

— Dans le troisième cas, des substrats de silicium implantés avec de l'arsenic (80 keV) à des doses comprises entre 1 et $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ sont recuits laser (yag), après avoir été préalablement traités thermiquement à basse température (600 °C, 20 min).

Quel que soit leur mode de préparation, les surfaces des jonctions (comprises typiquement entre 0,05 à 1 cm^2) sont limitées par l'intermédiaire d'une structure mesa. Cette technique, outre sa simplicité, présente l'avantage d'éliminer les problèmes liés aux dommages induits par le traitement laser à interface Si-SiO₂ sur les diodes fabriquées par la technique planar et qui contribuent à accroître les courants de fuite.

2.3 MÉTHODES DE MESURE. — La localisation des atomes de dopant dans le réseau du silicium et leur distribution en profondeur ont été analysées par rétrodiffusion de particules chargées ($^4\text{He}^+$, 1 MeV), avec et sans conditions de canalisation. Les propriétés électriques des couches dopées et les caractéristiques des jonctions ont été mesurées au moyen de techniques de mesures classiques : résistance superficielle effectuée par la technique des quatre pointes, effet Hall, dans certains cas détermination des profils de concentration en porteurs actifs consistant à associer le décapage pas à pas de la surface par oxydation anodique à des mesures de résistance superficielle, enfin enregistrement des caractéristiques capacité-tension et courant-tension à l'obscurité.

3. Résultats expérimentaux.

3.1 PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES COUCHES DOPÉES. — Nous avons reporté sur le tableau I les valeurs des résistances superficielles mesurées sur ces différentes couches traitées par le laser. Dans tous les cas, les valeurs mesurées ($R = 20 \Omega/\text{SQ}$) sont beaucoup plus faibles que celles correspondant à des couches dopées par diffusion thermique ($R = 45 \Omega/\text{SQ}$). Ce résultat est lié principalement à la forte activité électrique de ces couches comme le confirment les mesures de concentration de porteurs n (cm^{-2}) effectuées par effet Hall qui sont également reportées sur le même tableau. Les profils de concentrations de porteurs dans ces couches présentent un fort gradient de distribution avec un maximum en surface n_s (cm^{-3}), qui peut être très supérieur à la solubilité limite de l'élément dopant considéré à l'équilibre thermodynamique [6] n_e (cm^{-3}) (Tableau I). Notons que ces solutions sursaturées présentent un caractère métastable puisqu'un traitement thermique post laser ($T \geq 400$ °C) diminue leur activité électrique.

3.2 PROPRIÉTÉS DE JONCTION. — Nous avons comparé sur la figure 1, les caractéristiques courant-tension d'une diode diffusée thermiquement avant et après traitement laser. Nous observons une forte dégradation des caractéristiques de la diode irradiée, principalement aux faibles tensions de polarisation directe et en polarisation inverse.

La caractéristique courant-tension d'une jonction N-P obéit à une équation de la forme [7] :

$$J = J_{\text{OR}} \exp \frac{qV}{n_{\text{R}} KT} + J_{\text{OD}} \exp \frac{qV}{n_{\text{D}} KT} \quad (1)$$

où J_{OR} et n_{R} représentent respectivement les courants de recombinaison et le facteur de qualité de recombinaison, et J_{OD} et n_{D} , le courant de diffusion et le facteur de qualité de diffusion. Les valeurs de ces différents paramètres ont été calculées et sont reportées sur le tableau II. La diode irradiée présente un fort accrois-

Tableau I.

	Diffusion thermique (P) — 850 °C	Diffusion thermique (P) + laser	Diffusion laser (Sb)	Implantation (As)- $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ + laser	Implantation (As)- $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ + laser
R (Ω)	45	20	20	20	15
n (cm^{-2})	6×10^{15}	$1,7 \times 10^{16}$	$1,1 \times 10^{16}$	$1,0 \times 10^{16}$	$4,8 \times 10^{16}$
n_s (cm^{-3})	2×10^{20}	5×10^{20}	$1,2 \times 10^{21}$	8×10^{20}	$4,5 \times 10^{21}$
n_e (cm^{-3}) $T = 1\,200$ °C	4×10^{20}	4×10^{20}	6×10^{19}	6×10^{20}	6×10^{20}

Tableau II.

Jonction	Surface (cm ²)	n_R	J_R (A/cm ²)	n_D	J_D (A/cm ²)	J_F (-1 V) (A/cm ²)
Diffusion therm.	1,13	1,7	1×10^{-8}	1,7	1×10^{-8}	2×10^{-7}
Diffusion therm. + laser	1,13	4,27	$1,57 \times 10^{-5}$	1,76	$3,64 \times 10^{-8}$	$5,6 \times 10^{-5}$
Diffusion laser	1,13	6,4	$4,5 \times 10^{-5}$	1,7	1×10^{-8}	$1,2 \times 10^{-4}$
Diffusion laser	0,07	2	$8,3 \times 10^{-6}$	1,64	2×10^{-8}	$2,3 \times 10^{-6}$

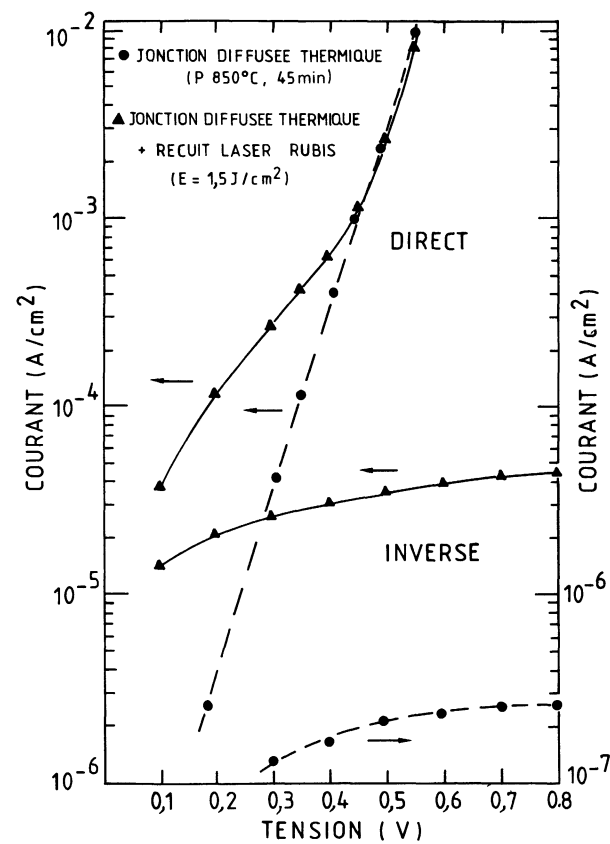


Fig. 1. — Effet du traitement laser décrit dans le texte sur les caractéristiques I - V d'une diode N-P obtenue par diffusion thermique.

[Dark function I - V characteristics of a diffused junction cell before and after laser treatment.]

sement de son courant de recombinaison J_{OR} et de son courant de fuite J_F (courant inverse mesuré à -1 volt), tandis que son courant de diffusion J_{OD} n'évolue pas.

Nous obtenons des résultats analogues dans le cas de jonctions diffusées laser, comme le confirme la caractéristique I - V reportée sur la figure 2. La dégradation de J_{OR} est toutefois plus marquée (Tableau II). Comme précédemment les paramètres de diffusion

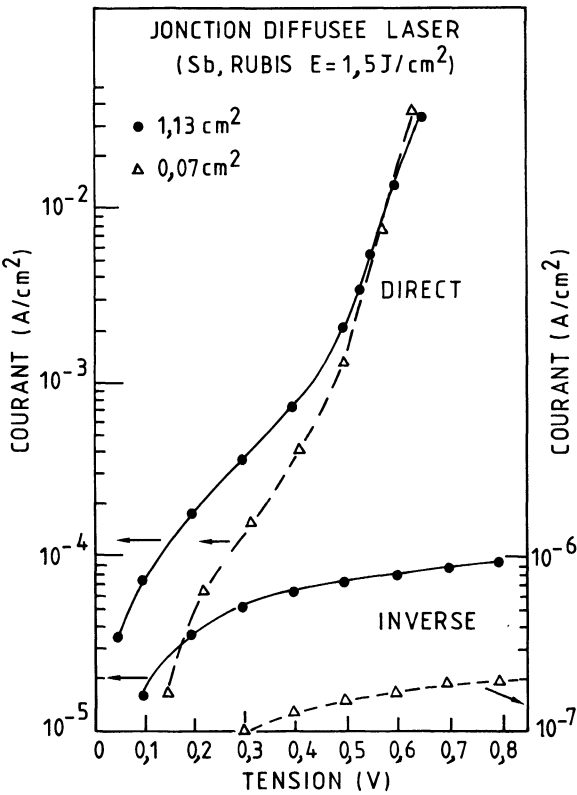


Fig. 2. — Effet de la surface de la diode sur les caractéristiques I - V .

[Effects of diode surface on I - V characteristics.]

J_{OD} et n_D ne sont pas modifiés par rapport à ceux mesurés sur une diode diffusée thermiquement. Notons que la diminution de la surface des diodes diffusées laser (0,07 cm²) a pour effet de diminuer notablement le courant de recombinaison J_{OR} et le facteur de recombinaison n_R (Fig. 2, Tableau II). Ce résultat tend à suggérer l'importance des effets de surface, qui pourraient avoir une double origine : d'une part les défauts induits par l'impulsion laser, d'autre part l'existence de fortes concentrations en porteurs actifs (Tableau I), responsables de la conductivité élevée des surfaces irradiées.

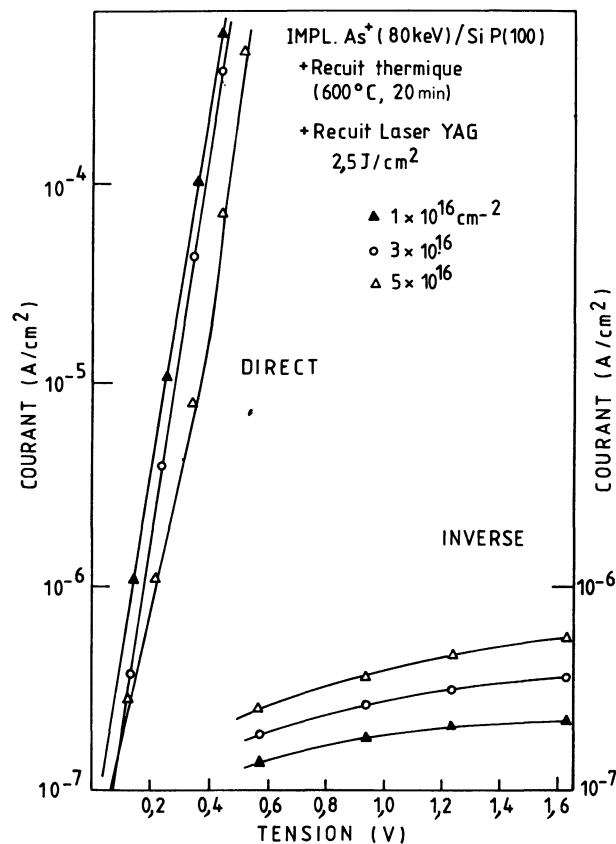


Fig. 3. — Influence du fort dopage sur les caractéristiques I - V d'obscurité.

[High effects on dark I - V characteristics.]

Afin de mettre en évidence la contribution du fort niveau de dopage, nous avons tracé (Fig. 3) les caractéristiques I - V de diodes fabriquées par implantation ionique et recuit laser, présentant des concentrations croissantes en porteurs actifs, comprises entre 8×10^{20} et $4,5 \times 10^{21}$ cm⁻³. Préalablement au recuit laser les échantillons ont subi un traitement thermique à basse température (600 °C) destiné à guérir les défauts électriquement actifs liés à la queue d'implantation et qui s'étendent en profondeur au-delà de la zone fondue par le laser. Les résultats de la figure 3 montrent

une dégradation du courant de recombinaison J_{OR} et du courant de fuite J_F quand la concentration en porteurs actifs s'accroît. Les valeurs respectives de ces différents paramètres ont été calculées et sont reportées sur le tableau III.

4. Discussion.

On distingue deux origines principales à ces courants élevés :

— Centres de recombinaison générés par l'impulsion laser dans la zone de charge d'espace et à la surface de la jonction (états de surface).

— Le niveau de dopage très élevé induit par l'impulsion laser.

4.1 CENTRES DE RECOMBINAISON. ETATS DE SURFACE. — L'analyse des défauts induits dans le silicium par l'impulsion laser a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux qui se fondent principalement sur l'étude des transitoires de capacité (DLTS) [8]. Le comportement donneur des défauts introduit par le laser dans des échantillons de silicium CZ ou FZ, de type P ou N, a été clairement démontré par Kimerling [9].

Leur concentration est maximale à la surface de l'échantillon et leur distribution en profondeur est de type exponentiel. Leur origine est généralement attribuée au phénomène de trempe auquel est soumis le matériau pendant le recuit laser, comme le confirme leur guérison après un traitement thermique post-laser (500-700 °C). La caractéristique capacité-tension d'une jonction diffusée thermiquement qui a subi un traitement laser, ne présente plus un comportement normal, linéaire en $1/C^2$ avec la tension, entre 0 et -1 V (Fig. 4). Cette modification que l'on observe également dans le cas de jonctions diffusées laser et implantées recuit laser, traduit un effet de compensation du niveau de dopage initial du substrat de type P par les niveaux donneurs générés dans la zone irradiée. Nous avons, par ailleurs, vérifié que ces diodes retrouvaient un comportement linéaire en $1/C^2$ entre 0 et -1 V, quand on les soumet à un traitement thermique post-laser (600 °C).

Tableau III.

Dose implantée As (cm ⁻²)	Concentration de porteurs (cm ⁻³)	n_R	J_R (A/cm ²)	n_D	J_D (A/cm ²)	J_F (-1 V) (A/cm ²)
1×10^{16}	8×10^{20}	1,53	$2,31 \times 10^{-7}$	1,53	$2,31 \times 10^{-7}$	$2,23 \times 10^{-6}$
3×10^{16}	3×10^{21}	1,80	$4,6 \times 10^{-7}$	1,50	1×10^{-7}	$4,7 \times 10^{-6}$
5×10^{16}	$4,5 \times 10^{21}$	2,70	$7,4 \times 10^{-7}$	1,36	$4,2 \times 10^{-9}$	$7,9 \times 10^{-6}$

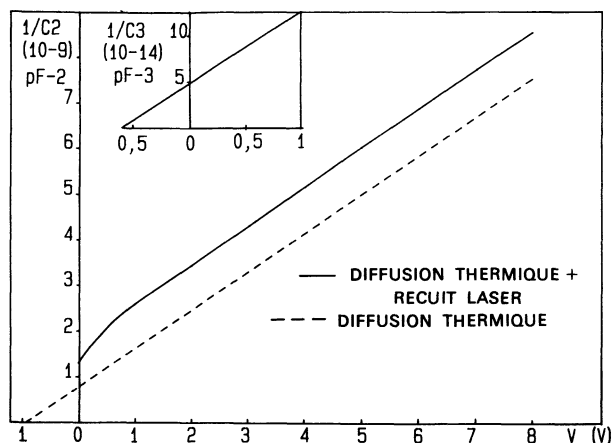


Fig. 4. — Caractéristiques capacité-tension d'une diode diffusée thermiquement avant et après recuit laser.

[C-V characteristics of a diffused junction cell before and after annealing.]

Cependant, d'autres interprétations ont été proposées pour expliquer de telles modifications de la loi $C(V)$. Ainsi Fonash [10] a observé un comportement analogue dans des échantillons de silicium de type P dont la surface avait été endommagée lors du dépôt du contact redresseur par pulvérisation au moyen d'un faisceau d'ions. Il suggère que les dommages ainsi créés n'ont pas seulement pour conséquence d'accroître la vitesse de recombinaison des porteurs en surface, mais aussi tendent à modifier la courbure des bandes du silicium. Il en résulterait des phénomènes de compensation du matériau de base et même une inversion de son type en surface. Par ailleurs, on peut avancer l'hypothèse que des défauts de structure, induits par le laser à la surface du silicium vierge ou dopé aient des effets comparables. Parmi les défauts de structure générés par l'impulsion laser, citons : les inhomogénéités périodiques qui se développent à la surface des zones traitées et qui sont dues à des effets d'interférence, les dommages résultant des inhomogénéités spatiales de l'impulsion laser, enfin la formation dans certaines conditions expérimentales, d'une structure cellulaire à la surface des échantillons hyperdopés. Tous ces défauts sont générateurs de centres de recombinaison dans la zone de charge d'espace et d'états de surface susceptibles d'accroître les vitesses de recombinaison des porteurs donc de dégrader les courants de recombinaison et les courants de fuite des jonctions.

4.2 NIVEAU DE DOPAGE ÉLEVÉ. — Les résultats de la figure 3 suggèrent une contribution du fort niveau de dopage à la dégradation des caractéristiques I - V . Une évaluation quantitative de cet effet reste cependant délicate. En effet, les défauts induits par le laser, indépendamment du niveau de dopage, contribuent au moins partiellement à la dégradation des courants de recombinaison et de fuite, comme nous l'avons vu précédemment.

Lindholm, Li et Sah [11, 12] ont montré que l'existence de niveaux de dopage élevés contribuait à accroître les courants de recombinaison. Pour de fortes concentrations de porteurs actifs, deux mécanismes supplémentaires interviennent : dégradation de la durée de vie des porteurs minoritaires dans la zone très dopée (émetteur) résultant des processus de recombinaison Auger et diminution de la largeur de la bande interdite qui a pour effet d'accroître la concentration intrinsèque de porteurs. La diminution de la largeur de la bande interdite peut avoir plusieurs origines : formation de queue de bande, constitution de bandes d'impuretés, enfin existence de contraintes induites dans le réseau cristallin par le désordre structural lié au fort niveau de dopage. Tous ces mécanismes conduisent à un accroissement du courant de saturation des jonctions. Cependant, l'augmentation considérable attendue pour le courant de diffusion consécutif à l'accroissement de n_i est sérieusement atténuée par la valeur très élevée de la concentration de donneur qui se trouve au dénominateur dans l'expression donnant le courant. Enfin Redfield [13, 14] montre que l'existence de forts gradients de distribution de dopant dans l'émetteur pourrait aussi contribuer à la valeur élevée des courants de saturation.

5. Conclusions.

Les caractéristiques courant-tension des jonctions fabriquées par recuit laser, dans des conditions conduisant à la fusion superficielle, présentent des modifications importantes par rapport à celles qui sont fabriquées par recuit thermique classique. On observe principalement une dégradation du courant de recombinaison et du courant de fuite de ces dispositifs qui peuvent avoir deux origines : d'une part les défauts induits par l'impulsion laser dans la zone fondue sous la forme de centres de recombinaison dans la zone de charge d'espace et d'états de surface, d'autre part l'existence en surface de très fortes concentrations en porteurs électriquement actifs résultant de l'augmentation de la solubilité limite des dopants par rapport à leur valeur à l'équilibre thermodynamique.

Bibliographie

- [1] MULLER, J. C., FOGARASSY, E., SALLES, D., STUCK, R., SIFFERT, P., *IEEE Trans. Electron Devices*, special issue solar cells 1980, p. 815.
 - [2] FOGARASSY, E., STUCK, R., GROB, J. J., SIFFERT, P., *J. Appl. Phys.* **52** (2) (1981) 1076.
 - [3] YOUNG, R. T., WOOD, R. F., CHRISTIE, W. H., *J. Appl. Phys.* **53** (2) (1982) 1178.
 - [4] HESS, L. D., ECKHARDT, G., KOKOROWSHI, S. A., OLSON, G. L., GUPTA, A., CHI, Y. M., VALDEZ, J. B., ITO, C. R., NAKAJI, E. M., LOU, L. F., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* V. 13 (1983) p. 337 (Elsevier Sci. Publis. Co).
 - [5] FOGARASSY, E., STUCK, R., MULLER, J. C., GROB, A. and J. J., SIFFERT, P., 2nd E.C. Photovoltaic solar energy conf. 1979 (Berlin). Edited by Van Overstraeten p. 768.
 - [6] TRUMBORE, F. A., *Bell Syst. Techn. J.* **39** (1960) 205.
 - [7] WOLF, M., RAUSCHENBACH, H., *Advanced Energy Conversion* **3** (1961) 455.
 - [8] LANG, D. V., *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 3014.
 - [9] KIMERLING, L. C., BENTON, J. L., *Laser and Electron Beam Processing of materials* edited by C. W. White, and P. S. Peercy (Academic Press) 1980, p. 385.
 - [10] FONASH, S. J., ASHOK, S., SINGH, R., *Appl. Phys. Lett.* **39** (5) (1981) 423.
 - [11] LINDHOLM, F. A., LI, S. S., SAH, C. T., 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. 1975, 3.
 - [12] LINDHOLM, F. A., SAH, C. T., *IEEE Trans. Electron Dev.* V. **Ed24** (1977) 299.
 - [13] REDFIELD, D., *Appl. Phys. Lett.* **33** (6) (1978) 531.
 - [14] REDFIELD, D., *Appl. Phys. Lett.* **35** (2) (1979) 182.
-